

结 构 抗 震 试 验

朱伯龙 主编

地 震 出 版 社

1 9 8 9

前 言

自1976年唐山地震以来,由于党和政府对抗震防灾的重视,我国地震工程研究工作有了迅速的发展。现代化的加载和测试手段的广泛使用,大大推动了工程结构抗震研究工作的发。展。在此期间,国内投入了大量的人力、物力进行抗震试验,而各类结构完成的试验数量在国际上也是罕见的。因此,如何提高结构抗震试验质量,解决结构抗震试验中存在的技术问题,是国内同行共同关心的问题。

编者自1955年春进行钢筋混凝土圆柱形薄壳结构试验以来,一直从事结构的试验和理论研究。唐山地震以来更多地从事结构抗震静力和动力的试验以及理论研究,从中备尝艰辛与经受教训。特编写此书以供研究、高校和设计单位的科研、教学和设计人员参考,为提高结构抗震试验水平尽一点力量。

在编写本书过程中,考虑了以下几点:

- (1) 将结构抗震周期性和非周期性、静力和动力试验给以名符其实的分类。
- (2) 本书重点放在抗震试验设计上,以区别于一般的结构试验书。
- (3) 本书专门有一章讨论有关抗震性能和抗震能力评定的问题。
- (4) 本书各章收入较多的实例,以供读者参考。

除编者外,本书的第三、四章由姚振纲同志编写,第一章第四节与第六章第五节由吕西林同志编写。此外同济大学工程结构研究所不少同志为本书提供了试验资料,书中也引用了兄弟单位的试验资料,特此一并致谢。

近代结构抗震试验技术与试验理论发展很快,限于编者业务水平,书中必有误漏之处,敬希同行和读者批评指正。

朱伯龙

1988年4月

内 容 提 要

本书主要论述结构抗震试验设计、抗震试验方法和抗震试验结果的评价。全书共分六章。第一章介绍抗震试验分类及试件设计概述。第二到第五章分别介绍周期性结构抗震静力及动力试验和非周期性结构抗震静力及动力试验。最后一章论述通过试验对结构抗震性能及抗震能力的评定。本书的重点为结构抗震的试验设计。

本书可作为土建专业研究人员、设计人员和高等学校土建专业本科生及研究生的参考用书。

结 构 抗 震 试 验

朱伯龙 主编

责任编辑：蒋乃芳

地震出版社 出版

北京复兴路63号

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 11印张 278千字

1989年2月第一版 1989年2月第一次印刷

印数 0001—4600

ISBN 7-5028-0091-3/TU·2

(493) 定价：5.30元

目 录

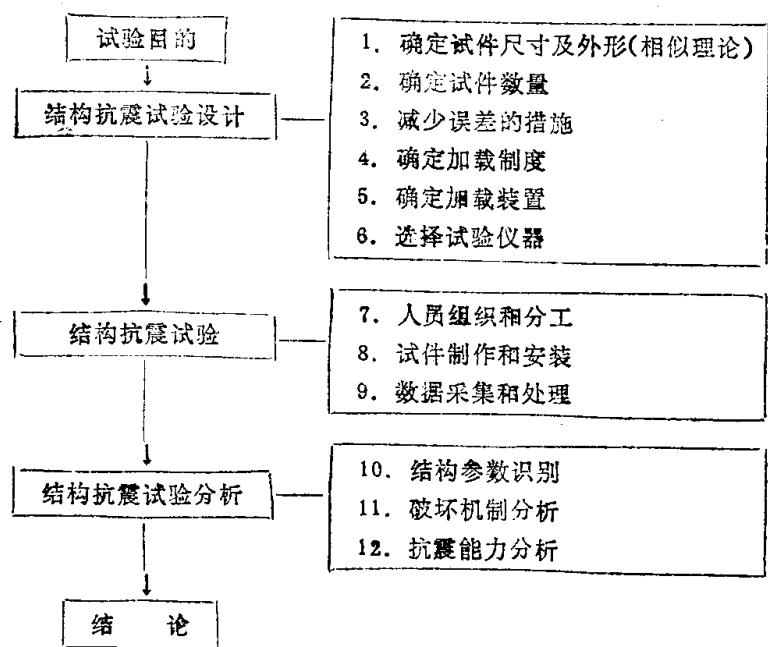
第一章 结构抗震试验概论	(1)
第一节 结构抗震试验分类	(1)
一、结构抗震静力试验	(1)
二、结构抗震动力试验	(2)
第二节 国内外结构抗震试验概况	(2)
一、国外结构抗震试验	(2)
二、国内结构抗震试验	(5)
第三节 结构试件尺寸	(6)
第四节 结构抗震模型试验的相似条件	(8)
一、结构抗震静力试验模型	(8)
二、结构抗震动力试验模型	(11)
第五节 试件数量设计	(13)
第六节 试验误差	(17)
一、试件尺寸误差	(17)
二、材料强度误差	(18)
三、试件安装误差	(18)
四、试验设备读数误差	(19)
五、试验方法非规范误差	(19)
六、数据分析误差	(19)
第二章 周期性结构抗震静力试验	(20)
第一节 结构抗震试验的试件类型	(20)
一、梁式试件	(20)
二、柱式试件	(21)
三、节点及框架组合件试件	(22)
四、框架试件	(23)
五、剪力墙及墙体试件	(23)
第二节 周期性结构抗震静力试验的加载装置	(26)
一、反力装置	(26)
二、加载器	(28)
三、边界条件	(30)
第三节 周期性结构抗震静力试验的加载制度	(32)
一、加载制度的几种方案	(32)
二、关于加载制度的讨论	(35)
第四节 传感器的设置	(36)
第五节 周期性结构抗震静力试验实例	(37)
第三章 非周期性结构抗震静力试验	(62)

第一节 非周期性静力试验·····	(62)
第二节 计算机-加载器联机系统试验·····	(63)
一、计算机-加载器联机系统的试验设备和加载制度·····	(64)
二、两个自由度结构地震反应的联机试验·····	(66)
三、等效单自由度体系的联机试验·····	(68)
第三节 计算机-加载器联机试验实例·····	(70)
第四章 周期性结构抗震动力试验·····	(91)
第一节 周期性动力试验的加载设备·····	(91)
一、起振机动力加载·····	(91)
二、电液伺服加振器动力加载·····	(93)
三、周期性单向振动台动力加载·····	(94)
第二节 周期性动力试验的加载方法·····	(97)
一、动力和静力加载在速率上的区别·····	(97)
二、周期性动力试验的加载制度·····	(98)
三、周期性动力试验中加载设备与加载方法·····	(99)
第三节 结构周期性动力加载试验实例·····	(100)
第五章 非周期性结构抗震动力试验·····	(111)
第一节 模拟地震振动台·····	(111)
一、振动台试验系统·····	(111)
二、试件设计·····	(119)
三、传感器的设置·····	(119)
第二节 模拟地震振动台试验实例·····	(120)
第三节 产生“人工地震”的方法和效果·····	(127)
一、直接爆破·····	(127)
二、密闭爆破·····	(127)
三、我国在“人工地震”中获得的成果·····	(128)
第四节 爆炸模拟地震结构试验实例·····	(128)
第五节 天然地震试验·····	(131)
一、概况·····	(131)
二、天然地震试验场·····	(131)
第六章 结构抗震性能和抗震能力的评定·····	(134)
第一节 概述·····	(134)
一、抗震性能和抗震能力的区别·····	(134)
二、在识别系统的力学模型中人工与计算机优选的区别·····	(135)
三、周期性加载与非周期性加载的区别·····	(135)
四、个别与一般的区别·····	(135)
第二节 周期性加载下骨架曲线和滞回环的主要特征·····	(136)
一、滞回环的曲线图形·····	(136)
二、强度·····	(136)
三、延性系数和变形能力·····	(137)
四、刚度·····	(139)

五、等效粘滞阻尼系数和功比指数.....	(140)
第三节 周期性加载下恢复力特性的模型化	(141)
一、习见的几种恢复力模型.....	(141)
二、恢复力特性模型化的实例.....	(142)
第四节 一般识别系统力学计算模型的方法	(147)
第五节 用系统识别方法识别力学计算模型和恢复力模型	(152)
一、系统识别问题概述.....	(152)
二、系统识别中的参数优化方法——单纯形循环法.....	(153)
三、非线性结构动力模型的系统识别方法.....	(153)
第六节 结构抗震能力的评定	(158)
一、通过周期性结构抗震静力试验评定抗震能力.....	(159)
二、通过非周期性结构抗震静力试验评定抗震能力.....	(161)
三、通过周期性结构抗震动力试验评定抗震能力.....	(161)
四、通过非周期性结构抗震动力试验评定抗震能力.....	(162)
参考文献	(165)

第一章 结构抗震试验概论

在长期抗御地震灾害中，人们认识到工程结构抗震试验是研究结构抗震性能的一个重要方面。可是，怎样使试验做到既解决问题又很经济却不太容易。因为地震的发生是随机的，地震发生后的传播是不确定性的，从而导致结构的地震反应也是不确定性的，这给确定试验方案带来了困难。一般说来，结构抗震试验包括三个环节：结构抗震试验设计、结构抗震试验和结构抗震试验分析。它们的关系如下：



三者中，结构抗震试验设计是很关键的。本章将讨论试验设计的前三个内容(1—3)，而后三个内容(4—6)将在第二至第四章中讨论。

第一节 结构抗震试验分类

结构抗震试验可分为两大类：结构抗震静力试验和结构抗震动力试验。

一、结构抗震静力试验

结构抗震静力试验又称拟静力或伪静力试验。其含义为以静力的方式模拟地震作用的试验。虽然拟静力或伪静力试验这一名词，既不确切也令人费解，但在地震工程中却常为人采用。结构抗震静力试验又分为周期性加载试验和非周期性加载试验。

1. 周期性加载试验

周期性加载是指按一定的力或位移周期性地反复或重复加载。周期性的反复静力加载试验，是从50年代后期为确定构件或结构恢复力模型开始的；到60—70年代更多的人通过滞回面积研究能量耗散，从而受到工程抗震设计及科研人员的普遍重视。目前国内外结构抗震试验多集中于这一方面。

2. 非周期性加载试验

周期性加载试验实际上不能和任一次确定性的非线性地震反应结果相比。70年代后期发展的一种计算机-加载器联机试验可以弥补这一不足。通过每一时刻试验机静力加载获得的恢复力,可以输入计算机求得地震位移反应,按这一位移(大小和方向)进行下一步加载以求得新的恢复力。这样,如果以某一确定性的地震加速度记录输入,通过这一联机系统就可以求得结构恢复力-位移的非周期性关系。有人称之为拟动力试验。当然,其本质仍为静力试验。

静力试验最大的优点是设备比较简单,在逐步加载中可以停下来供人们仔细观察其变形和破坏现象,从而给人们以最明确和清晰的破坏概念。缺点是不能反映实际地震时材料应变速率的影响。

二、结构抗震动力试验

与结构抗震静力试验相比,结构抗震动力试验可以提供一定的应变速率。它又分为:周期性动力试验和非周期性动力试验。后者又分为模拟地震振动台试验和爆炸模拟地震试验。

1. 周期性动力试验

产生周期性强迫振动的动力试验设备有三种:①安装在结构上的激振器;②电液伺服加载器;③振动台。前两种是结构底部不动,周期性的干扰从上部输入,而后一种周期性干扰是从结构底部输入。

2. 非周期性动力试验

周期性动力试验,除使试件具有一定的应变速率外,和周期性静力试验一样,与真实地震效应相差甚远。下面两种试验可在一定程度上改善上述情况。

(a) 模拟地震振动台试验

将制作好的模型或结构构件放在模拟地震振动台上,台面输入某一确定性的地震记录,能够较好地反映该次确定性地震作用的效果。但建设振动台的投资很大而且台面尺寸要限制结构试件的尺寸。

(b) 爆炸模拟地震试验

在现场引爆大量炸药或按一定的规律引爆一系列的地下爆炸线源,可产生接近于地震的地面运动。它的优点是结构可以预先在试验场地建造,从而得到接近于地震的破坏试验结果。

不论哪一种非周期性的动力试验,在结构破坏阶段都能提供比静力试验更接近真实的情况。当然,最理想的是天然地震试验。

第二节 国内外结构抗震试验概况

一、国外结构抗震试验

近20多年来,结构抗震试验在国外发展迅速,推动了结构抗震的研究工作。可以分下面几个方面概括地加以说明。

1. 试验的目的性

早在50年代日本和美国就开展了结构恢复力特性的试验研究,从而为60年代结构非线性地震反应研究创造了条件。恢复力特性是结构抗震性能试验的一个重要方面,它提供了构件的强度、刚度、变形能力、滞回环形状和耗能能力。通过恢复力特性试验还可以获得构件的破坏机制。近十几年来,对复合受力构件、组合构件、预应力构件以及砌体构件的破坏机制的研究更为重视。这对进一步研究如何提高结构和构件的抗震能力提供了途径。

为了不断改善结构的抗震能力，例如提高短柱的延性，改善砌体的变形能力，选择剪力墙开洞的合理位置等等，需要设计出不同方案的试件进行试验对比。通过低周疲劳试验获得的加载循环次数与强度或刚度退化的关系，可以比较不同设计方案抗震能力的强弱。特别是近年来日益受到重视并在实际工程中应用的耗能元件和减震系统更需要通过抗震试验加以鉴定。

在大量试验的过程中不断发现过去规范中抗震条文的缺点。因此，为改进规范条文而进行的试验日益增多。特别在钢筋混凝土结构方面，对柱子箍筋的设置、钢筋搭接的要求、节点核心区的构造、构件抗剪能力的改善等等，都要通过结构抗震试验来逐步积累制订规范条文所需要的科学数据。

为上述目的所进行的试验研究，大多是结构静力抗震试验。但近年来，为了更好地探索结构在接近真实地震情况下的抗震性能、动力试验，特别是非周期性的动力试验一天天多起来。动力试验可以提供静力试验所不能提供的更接近于实际地震的震害现象。

2. 试验的设备

在静力加载方面，从简单的往复千斤顶装置发展到加载机，日本70年代为研究短柱还专门设计了“建研式”加载机（图1.1）。此外，在计算机-加载机联机系统中，还要有一套与计算机相接的模控系统，计算机解出的数据通过模控系统可以指挥加载器（电液伺服式千斤顶）工作。

在动力加载方面，有激振器、振动台（电磁或电液伺服）、加振器（动力加载系统）、模拟地震振动台等等，一种比一种费用大。即使是现场爆炸模拟地震，每次投资也比静力试验高得多。目前世界上最大的模拟地震振动台为 $15 \times 15\text{m}^2$ ，属于日本原子能工程试验中心。

在动力试验中，除了加载装置以外，还要把各种反应的信息记录下来。这样，就需要有各种形式的应变计、位移计和加速度计等等。而这些传感器的信息又要通过数据采集系统采集和储存起来，经过计算机运算转为物理量复印成曲线或数字。目前，这一类的数据采集和数据处理系统已经相当完善，不仅能作静力试验也胜任动力试验。

3. 构件的类型和材料的品种

数量最多的试验是对单根构件，例如梁（受弯、受剪或受弯剪）、柱（受压、受剪压、单向或双向）、框架、节点以及剪力墙等。大多为小尺寸模型试件，足尺试验较少，因为后者耗资巨大。美国在1955及1956年建造了两栋四层钢筋混凝土足尺框架，分别于1974和1979年用激振器进行试验。

在建筑材料方面：有钢筋混凝土，型钢和劲性钢筋混凝土，以及用砖、砌块、石或土制作的砌体，发展中国家对砌体的抗震性能研究更感兴趣。

4. 恢复力特性的模型化以及恢复力特性曲线的计算

1979年在意大利由几个国际学会召开的“在地震作用下的结构混凝土”专题讨论会上，日本青山博之作了混凝土恢复力曲线的模型化，加藤勉作了钢的恢复力曲线模型化，希腊Tassios作了钢筋和混凝土之间粘结力恢复力曲线模型化的总报告。他们的报告总结了过去研究的成果，对推动恢复力曲线计算是很有益的。

除了材料恢复力曲线模型化以外，直接用于非线性地震反应的构件恢复力模型化问题也一直受到重视。除了通常使用的双线型、多线型（考虑退化）、NCL等曲线外，1980年在第七届世界地震工程会议上不少学者又发表了更复杂的恢复力曲线。

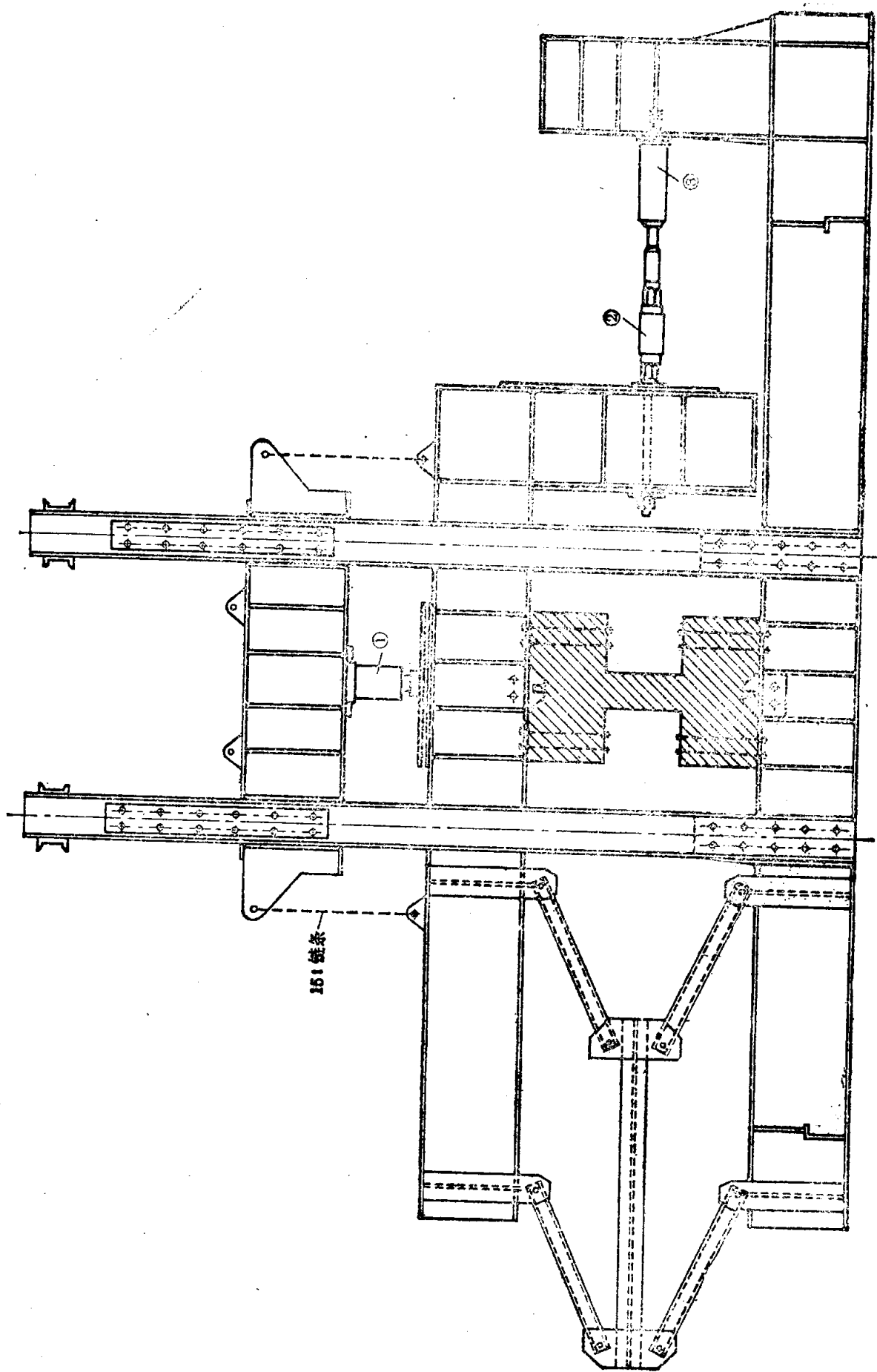


图1.1 日本建研式加载机

- ① 1000kN千斤顶(加垂直荷载); ② 500kN拉压传感器(测水平荷载);
③ 500kN千斤顶(加水平荷载)

构件恢复力曲线可在材料本构关系确定后,再经一系列假定用电子计算机求得。除了用古典的方法计算恢复力曲线外,美国Bazant用内在时间理论(Endochronic)分析一些以剪切变形为主的钢筋混凝土构件,取得了较好的结果。

5. 结构抗震试验的国际合作

近代结构抗震试验的另一个特点是国际合作有所加强。特别引人注目的是日美钢筋混凝土多层框架的合作试验研究项目。这个项目从70年代末起,在日本进行大型结构试验,而在美国进行缩尺试验,相互比较。1984年第八届世界地震工程会议就为这一项目专门组织了分组报告。此外,1984年由新西兰、美国和日本三国高校对钢筋混凝土框架(以节点、梁、柱组合件为主)合作进行研究,1985年又邀请中国建筑科学研究院和同济大学参加。国际合作的开展,有利于结构抗震工作,对结构抗震试验也是一种很好的推动。

二、国内结构抗震试验

自1976年唐山地震以后,在全国范围内开展了地震工程的研究。近几年来,通过各种渠道充实和更新了大量抗震试验设备,结构抗震试验的数量和质量也有不断提高。

1. 试验的目的性

唐山地震以后,北京市建筑设计院针对多层砖房的严重震害进行模型房屋加固试验研究。因此,我国的结构抗震试验是从提高抗震能力开始的。在以后的一段时间里,高等学校偏重于恢复力特性的研究而部委和地方的科研机构则偏重于构件的抗震性能研究。近几年来,大多数高等学校和专门研究机构以编制各种规范、规程、措施为背景,大量开展结构抗震试验研究。同时,结构动力试验也受到了重视。

2. 试验的设备

在静力试验方面,四川省建筑科学研究所等单位装备了如图1.1所示的加载机。中国建筑科学研究院从日本引进的促动器-模控系统可以进行计算机-加载器联动的拟动力试验。

在动力试验方面,同济大学从美国引进的模拟地震振动台于1983年底已投入运转(照片)。水利电力科学院从西德引进的模拟地震振动台于1987年建成。

在近几年内,不少高校引进了数据采集和数据处理系统。目前同济大学等随同振动台引进的数据采集和数据处理系统是比较先进的。

3. 构件的类型和材料的品种

由于设计规范和规程的需要,国内试验的项目几乎遍及所有需采取抗震措施的构件。值得指出,有一段时间,国内连续进行了若干幢足尺房屋的静力加载试验,由于耗资很大,对其是否经济合理,尚有不少争论。

在材料方面,国内主要从事钢筋混凝土以及砌体的抗震试验;而后者的数量、深度在国际上是罕见的。

4. 恢复力特性的模型化以及恢复力曲线的计算

1981年中美两国在密执安大学召开的钢筋混凝土抗震专题讨论会上,编者撰文并发言介绍了国内各单位对钢筋混凝土压弯构件恢复力模型所做的工作。此外,在砌体方面也有若干单位提出了恢复力模型,编者建议的“半退化三线型”也被振动台试验所证明。通过模拟地震振动台试验,同济大学吕西林博士的论文提出了砌体在破坏阶段的“剪力-滑移”模型。

有关恢复力曲线的计算,自1979年以后有不少论文发表,编者等的《钢筋混凝土非线性分析》(同济大学出版社,1985年)一书较系统地论述了这方面的工作。其中关于考虑裂面



同济大学模拟地震振动台

效应的混凝土等效应力-应变试验，已收入欧洲混凝土协会第161号文件。

从整个结构抗震试验看来，国内外的差距不大。在砌体结构试验方面还具有我国自己的特色并有相当的研究水平。

第三节 结构试件尺寸

结构抗震试验中，对试件的大小一直是有争论的。其实，试件尺寸受以下几个因素的制约：

- (1) 尺寸效应；
- (2) 构造效果；
- (3) 设备条件；
- (4) 经费可能。

1. 尺寸效应

在混凝土和砌体两种结构材料中，尺寸效应是比较显著的。而且，不同的受力状态尺寸效应也不一样。共同的特点是截面愈小强度愈高。

在考虑尺寸效应的问题上，目前有两种处理的方法：

(1) 由于试件尺寸愈大强度愈趋稳定，因此，可以定一个比较合理的、开始趋向稳定的尺寸。

(2) 找出尺寸效应关系，对小试件获得的强度进行折减。其实，在混凝土试块中，早就应用过上述两个原则。例如， $20 \times 20 \times 20 \text{cm}^3$ 立方体的强度比 $30 \times 30 \times 30 \text{cm}^3$ 立方体高一点，但以 $20 \times 20 \times 20 \text{cm}^3$ 为标准；在工地上大量采用 $15 \times 15 \times 15 \text{cm}^3$ ，就把抗压强度乘以折减系数换算为 $20 \times 20 \times 20 \text{cm}^3$ 立方体。

顺便指出：不仅在静力试验中存在着尺寸效应，在动力试验中同样也有尺寸效应。

2. 构造效果

众所周知,试件愈小愈节省材料,对加载能力的要求也愈低。但是,小试件往往很难满足构造要求。

在钢筋混凝土结构中,和构造密切连系的,如钢筋搭接、钢筋密集的节点区等等,试件尺寸太小就很难满足规范要求的构造规定。因此,当试件尺寸较大而又要满足构造要求时,除严格按照相似律(见下一节)以外,还要满足以下要求:

(1) 钢筋表面要求。在小试件中,主筋直径很小且往往材料是光圆的。因此,如果试件中要求的是螺纹钢筋,要把光圆的表面轧成螺纹。

(2) 石子要求。石子的粒径要满足钢筋之间浇捣的要求。

(3) 振捣要求。用同样的振捣器去振捣小试件其效果与大试件不同;而且当试件太小时,振捣器的使用要格外当心,应力求试件与立方体试块之间的同一性。

(4) 立方体试块要求。当试件尺寸较小时,立方体试块要与试件尺寸匹配,同时也要有适量的标准试块。特别要注意立方体试块与试件混凝土之间的同一性。

3. 设备条件

设备条件指的是:吊车起重能力,试验机加载吨位和试验设备净空。在试验室或现场试验中,吊车起重能力控制了试件的重量,试验机的加载能力控制了结构或构件的抗力,试验设备净空控制了试件尺寸。

以图1.1日本建研式加载机而言,它的竖向加载能力与机架强度有关,而它的水平加载能力又取决于机架构件的刚度,由于它有一定的净空,试件不能做得太高。

再以同济大学工程结构研究所的模拟地震振动台为例,由于台面竖向允许荷载最大为15t,吊车吊钩下净空8m,这就限制了试件的重量和高度等等。

在设计试件尺寸之前,先要确定加载方式,然后选定加载设备,否则会遭遇困难。

4. 经费可能

一般地说来,试件尺寸愈小愈为经济。例如,1979年在上海曾进行过五层砌块房屋的足尺试验,不仅需要一笔可观的试验房屋和支承房屋的加固费用,而且由于抗力很大,所需要的加载设备也多。此外,由于条件限制只进行了重复加载而未能进行反复加载。1984年在同济大学模拟地震台上做了1:4缩尺的三幢砌块房屋试验,这三幢房屋的费用远比一幢足尺的房屋小得多。

此外,在一定的经费情况下,要处理好试件尺寸和数量之间的关系。

试件尺寸是试验设计中的首要环节,它要影响以后的全部工作。因此,在符合试验目的的前提下,要求反映构造特点的试件尺寸可以适当大一些以力求接近实际;在研究破坏机制为主时,可以适当小一些以增加数量。那么,在一般情况下,构件尺寸大体上在什么范围比较合适呢?

1. 钢筋混凝土试件尺寸

(a) 基本构件

作为基本构件抗震性能研究,国外压弯构件的截面尺寸为 16×16 — $35 \times 35 \text{ cm}^2$;偏压剪(短柱为) 15×15 — $50 \times 50 \text{ cm}^2$;双向受力构件为 10×10 — $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 。国内试件一般也在这一范围之内。

(b) 节点及框架组合件

在节点等方面, 由于要求试件反映配筋的特点, 试件尺寸一般较大, 与原型的比例为 $1/2—1$ 。

(c) 框架

例如日本小高昭夫做过的单层单跨框架试验, 试件的柱子截面只有 $7 \times 7 \text{cm}^2$, 梁截面为 $7 \times 9 \text{cm}^2$, 全高 44cm , 跨度 65cm 。美国 Bertero 曾做过柱和梁只有 $7.3 \times 10 \text{cm}^2$, 高度和跨度都是 102cm 的框架。日本武藤清做过梁截面 $35 \times 50 \text{cm}^2$, 柱截面 $45 \times 45 \text{cm}^2$, 净高 1.5m , 净跨 3.7m 的框架试验; 尺寸比较适中。在国内试验中, 框架的截面尺寸为原型的 $1/4—1/2$ 。我国武汉工业大学做过足尺的轻板框架试验。

(d) 剪力墙

国外单层试件的外形尺寸为 $80 \times 100—178 \times 274 \text{cm}^2$; 多层剪力墙为原型的 $1/10—1/3$ 。国内试件一般也是如此。

一般说来, 当钢筋混凝土构件最小边长大于 10cm 时, 尺寸效应即不显著。

2. 砌体试件尺寸

横墙、纵墙(带窗)都是抗地震的主要构件。作为基本抗震性能研究, 试件尺寸为原型的 $1/4—1/2$ 比较合适。砌体房屋试验, 在静力试验中, 一般为 $1/2—1$, 而在模拟地震振动台中, 一般为 $1/4—1/6$ 。

第四节 结构抗震模型试验的相似条件

结构抗震试验也可以采用模型。模型是根据结构的原型, 按照一定的比例而制成的缩尺结构, 它具有原型的全部或部分特征。对模型进行试验可以得到与原结构相似的工作情况, 从而可以对原结构的工作性能进行了解和研究。模型试验一般包括模型设计、制作、测试和分析总结等四个内容, 而中心问题是如何设计。模型应该和原型相似, 并符合相似理论的要求。

相似理论是研究自然界相似现象的性质和鉴别相似现象的一门科学。它主要回答下列一些问题:

- (1) 模型的尺寸是否要与原型保持同一比例?
- (2) 模型是否要求与原型用同一材料?
- (3) 模型的荷载按什么比例缩小和放大?
- (4) 模型的试验结果如何推算至原型?

建立相似条件一般有两个途径:

- (1) 如果未知描述物理现象的基本方程, 可通过量纲分析来建立相似条件;
- (2) 如果已知描述物理现象的基本方程, 可根据基本方程建立相似条件。

本节主要根据上述两个途径导出相似关系式, 而对具体的导出方法不作详细讨论。

一、结构抗震静力试验模型

1. 静力试验模型的相似要求

在结构抗震静力模型试验中, 根据相似原理, 必须满足下列三组相似条件:

(a) 物理条件相似

模型与原型的物理条件相似, 就是要求模型与原型的相应各点应力和应变间的关系相同。

由弹性力学中的物理方程进行相似变换后可以定出:

$S_\mu=1 \quad S_\sigma=S_E S_\epsilon \quad S_\tau=S_G S_\gamma$ (1.1)

式中的 $S_\mu, S_\sigma, S_E, S_\epsilon, S_\tau, S_G, S_\gamma$ 分别为泊松系数、法向应力、弹性模量、法向应变、剪应力、剪切模量、剪应变的相似系数, 它们为原型与模型的相应物理量之比, 例如 $S_\mu=\frac{\mu_p}{\mu_m}$ (μ_p ——原型的泊松系数, μ_m ——模型的泊松系数), 等等。

(b) 几何条件相似

所谓几何条件相似, 就是要求模型与原型各相应部分的长度 L 互成比例。长度相似系数即称模型比例。几何相似条件就是长度、位移、应变等物理量相似系数间应该满足的关系。

根据变形体系的长度、位移、应变之间的关系, 可以导出相似条件为:

$S_x/(S_\delta S_l)=1$ (1.2)

刚度相似条件为:

$S_\delta S_l/S_K=1$ 或 $S_G S_l/S_K=1$ (1.3)

式中 S_x, S_l, S_K 分别为位移、长度、刚度的相似系数。

(c) 边界条件相似

结构模型试验的边界条件相似, 就是要求模型与原型在与外界接触的区域内的各种条件保持相似, 它包括支承条件相似、约束情况相似、在边界上的受力情况相似等。

模型的支承条件和约束条件可以通过结构构造来保证。例如对具有固定端的原型结构, 模型结构中相应的部位也要做成固定端, 以保证模型与原型的支承条件相似。对于力边界条件, 根据弹性力学中的方程进行相似变换后可得出下列相似关系式:

集中力或剪力 $P \quad S_P=S_\sigma S_l^2$ (1.4)

线荷载 $W \quad S_W=S_\sigma S_l$ (1.5)

面荷载 $q \quad S_q=S_\sigma$ (1.6)

弯矩或扭矩 $M \quad S_M=S_\sigma S_l$ (1.7)

式(1.1)~(1.7)所表示的各物理量之间的无量纲关系式, 是进行结构抗震静力模型试验必须遵守和换算原型结构性能的必要和充分条件, 它们是在理想弹性材料的情况下推导的。在工程结构试验中, 对于钢筋混凝土和砌体这类复合材料组成的结构, 还必须根据具体情况建立它们的相似关系式。

2. 钢筋混凝土结构静力模型的相似

钢筋混凝土结构静力模型试验的相似条件如表1.1所示, 表中 F 代表力, L 代表长度。

表1.1 钢筋混凝土结构静力模型试验的相似系数

类 型	物 理 量	量 纲	一 般 模 型	实 用 模 型
材 料 性 能	混凝土应力, σ_c	FL^{-2}	S_σ	1
	混凝土应变, ϵ_c	—	1	1
	混凝土弹性模量, E_c	FL^{-2}	S_σ	1
	泊松比, μ_c	—	1	1
	质量密度, ρ_c	FL^{-3}	S_σ/S_l	$1/S_l$
	钢筋应力, σ_r	FL^{-2}	S_σ	1
	钢筋应变, ϵ_r	—	1	1
	钢筋弹性模量, E_r	FL^{-2}	S_σ	1
	粘结应力, u	FL^{-2}	S_σ	1

(续表)

类 型	物 理 量	量 纲	一 般 模 型	实 用 模 型
几 何 特 性	几何尺寸, l	L	S_l	S_l
	线位移, δ	L	S_δ	S_δ
	角位移, β	—	1	1
	钢筋面积, A_s	L^2	S_s^2	S_s^2
荷 载	集中荷载, P	F	$S_\sigma S_l^2$	S_σ^2
	线荷载, W	FL^{-1}	$S_\sigma S_l$	S_l
	面荷载, q	FL^{-2}	S_σ	1
	力矩, M	FL	$S_\sigma S_l^3$	S_l^3

在钢筋混凝土结构中, 由于混凝土材料本身具有明显的非线性性质以及钢筋和混凝土力学性能之间的差异, 要模拟钢筋混凝土结构全部的非线性性能是很不容易的。从 $S_\sigma = S_\varepsilon$ 的含义来说, 要求物体内任何点的应力相似系数与弹性模量相似系数相同。实际上受力物体内各点的应力大小是不同的, 亦即各点的应变大小不同。对于不同的应变, 要求 S_ε 为常数, 这就要求模型与原型的应力应变关系曲线相似, 如图1.2所示。要满足这一关系, 只有当模型与原型采用相同强度和变形的材料时才有可能, 这时就要满足表1.1中“实用模型”一栏的要求。

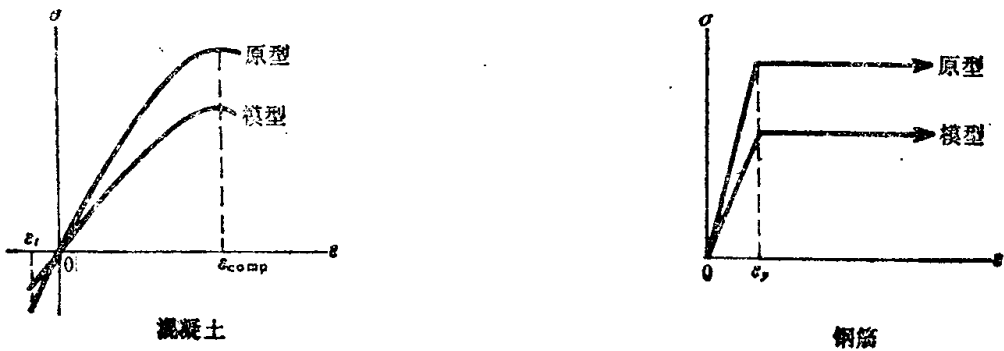


图1.2 模型与原型应力-应变关系相似图

3. 砖石结构静力模型的相似

国外从50年代开始就开展了砖石结构模型试验的研究, 国内也曾开展过这方面的工作。砖石结构抗震静力模型试验的相似要求如表1.2所示。

表1.2 砖石结构模型试验的相似系数

类 型	物 理 量	量 纲	一 般 模 型	实 用 模 型
材 料 性 能	砌体应力, σ_m	FL^{-2}	S_σ	1
	砌体应变, ε_m	—	1	1
	砌体弹性模量, E_m	FL^{-2}	S_σ	1
	砌体泊松比, μ_m	—	1	1
	砌体质量密度, ρ_m	FL^{-3}	S_σ/S_l	$1/S_l$
几 何 特 性	长度, l	L	S_l	S_l
	线位移, δ	L	S_δ	S_δ
	角位移, β	—	1	1
	面积, A	L^2	S_l^2	S_l^2

(续表)

类 型	物 理 量	量 纲	一 般 模 型	实 用 模 型
荷 载	集中荷载, P	P	$S_c S_l^2$	S_l^2
	线荷载, W	FL^{-1}	$S_c S_l$	S_l
	面荷载, q	FL^{-2}	S_c	1
	力矩, M	FL	$S_c S_l^3$	S_l^3

由表1.2可见, 对于砖石结构, 由于它是由两种材料组成的复合材料结构, 因此, 制作模型时在所有的细节上都要按比例缩小, 这无疑给模型制作带来了一定的困难。由于要求模型砌体有与原型相似的应力-应变曲线, 因此, 一个实用的途径就是采用与原型相同的材料。

二、结构抗震动力试验模型

1. 动力模型的相似要求

在结构抗震动力模型试验中, 除满足本节第一部分所述的三个条件外, 还要满足以下两组相似条件:

(a) 质点动力平衡方程式相似

对质点体系在地震动作用下的运动方程式进行相似变换后可以得到:

$S_c S_l / S_m = 1 \qquad S_c S_l^2 / S_m = 1 \qquad (1.8)$

同理, 可得固有周期的相似系数为:

$S_T = (S_m / S_k)^{1/2} \qquad (1.9)$

以上两式中的 S_m , S_k , S_l 分别为质量、刚度、时间的相似系数, S_c 为阻尼常数的相似系数, 它还可以化为阻尼比的相似系数。在上述推导中, 取重力加速度相似系数 $S_g = 1$ 。

(b) 运动的初始条件相似

为了保证模型与原型动力反应相似, 除两者的边界条件和运动方程式相似外, 还要求运动的初始条件相似, 从而使模型与原型动力方程式的解相似。运动的初始条件包括在初始状态下质点的位移、速度和加速度, 根据这些物理量之间的微分关系, 可以得到下列相似关系式:

$S_v = S_l \qquad S_a = S_v / S_l \qquad S_t = S_v / S_l^2 \qquad (1.10)$

式中的 S_v , S_a , S_t 分别为速度、加速度和时间 t 的相似系数, 它们反映了模型与原型的运动状态在时间上和空间上的相似关系。

结构动力模型试验中经常使用的一些相似关系式如表1.3所示。

同结构静力模型试验一样, 对于不同类型的工程结构物或结构构件, 还有不同的相似要求。例如对于钢筋混凝土结构, 要同时满足表1.1和表1.3的要求; 对于砌体结构, 要同时满足表1.2和表1.3的要求。另外, 对这些复合材料组成的结构, 尽可能从构造上做到模型与原型相似, 也十分重要。

2. 应用举例

关于在实际应用中如何满足上述相似条件问题, 国内外研究者进行了一些研究工作。苏联Nazarov强调指出, 在解决非线性的抗震问题及动力稳定问题时, 必须取应变相似系数 S_ϵ 为1。美国Krawinkler则指出, 对于动力试验, 不管是弹性的还是非弹性的, S_ϵ 必须为1; 他还举例说明建筑结构系统的动力反应可以十分精确地用缩尺试件来模拟。国内研究者的文章